

Säteilyturvallisuus hiukkaskiihdyttimien käytössä

Yhteenvetoa kansainvälisistä turvallisuusnäkökulmista
ja ehdotus vaatimuksiksi Suomeen

Jyri Lehto

Säteilyturvallisuus hiukkaskiihdyttimien käytössä

Yhteenvetoa kansainvälisistä turvallisuusnäkökulmista
ja ehdotus vaatimuksiksi Suomeen

Jyri Lehto

ISBN 978-952-309-348-5 (pdf)
ISSN 2243-1896

LEHTO Jyri. Säteilyturvallisuus hiukkaskiihdyttimien käytössä. Yhteenvetoa kansainvälisistä turvallisuusnäkökulmista ja ehdotus vaatimuksiksi Suomeen. STUK-B 208. Helsinki 2017. 29 s.

Avainsanat: hiukkaskiihdytin, syklotroni, kiihdytinlaitos, viranomaisvaatimukset, suositus, säteilyturvallisuus, rakenteellinen suojaus, hallinnollinen säteilysuojelukeino, suojamateriaali, säteilysuojeluohjelma, turvakytin, säteilyturvallisuusjärjestelmä, kulunhallintajärjestelmä, säteilynhallintajärjestelmä

Tiivistelmä

Säteilyturvakeskus (STUK) on valvonut isotooppituotannossa ja tutkimuskäytössä olevien hiukkaskiihdyttimien säteilyturvallisuutta soveltamalla ST-ohjeita ja yleisesti hyväksytyjä kansainvälisiä suosituksia. Tässä selvityksessä on käyty läpi keskeisiä kansainvälisiä ja muiden maiden kansallisia turvallisuussuosituksia ja -vaatimuksia hiukkaskiihdyttimien käytölle ja niiden käyttötiloille.

Säteilysuojelullisesta näkökulmasta hiukkaskiihdyttimien tärkeimpiä ominaisuuksia ovat kiihdytysenergia ja hiukkassuihkun teho. Näiden ominaisuuksien perusteella määräytyvät mm. syntyvän säteilyn ominaisuudet ja kiihdyttimen käytöstä aiheutuva aktivaatio. Selvityksessä on tarkasteltu hiukkaskiihdyttimien rakenteellisia suojauksia ja hallinnollisia säteilysuojelukeinoja. Rakenteellisiin suojauksiin kuuluvat mm. kiihdytintilojen suojaseinät ja -ovet sekä tilojen ja kiihdyttimien erilaiset turvakytimet. Hallinnollisiin säteilysuojelukeinoin lasketaan kuuluvaksi esimerkiksi annosrajoitukset ja henkilöiden pääsyn rajoittaminen tietyille alueille.

Selvityksessä annetaan ehdotukset kiihdytintoiminnan säteilyturvallisuusvaatimuksiksi Suomeen. Osa esitetyistä ehdotuksista koskee myös kiihdytinlaitoksen muita osia kuin suoraan itse kiihdytintoimintaa, kuten lyijykaappeja (hot cell). Nämä osat liittyvät kiinteästi esimerkiksi hiukkaskiihdyttimien avulla valmistettavien radiolääkkeiden valmistus- ja tutkimustoimintaan.

LEHTO Jyri. Radiation safety for the operation of particle accelerators - Review of the international safety aspects and a proposal for the requirements in Finland. STUK-B 208. Helsinki 2017. 29 s.

Key words: accelerator, cyclotron, cyclotron facility, regulatory control, recommendation, radiation safety, engineered controls, administrative controls, shielding material, radiation safety program, interlock, radiation safety system, access control system, radiation control system

Abstract

Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK) has regulated radiation safety of particle accelerators used for isotope production or research purposes by adapting ST Guides and commonly accepted international guidelines. This report reviews some of the essential international and other countries national safety recommendations and requirements for the safe use of the accelerators and accelerator facilities.

The most important features in the radiation safety point of view of the accelerators are the energy and power of the beam. These features determinate e.g. the quality of the beam and the activation caused by the use of the accelerator. This report reviews different engineered and administrative controls. Engineered controls include e.g. accelerator facility's interlocks and shielding of walls and doors. Some examples of administrative controls are dose constraints and access controls.

The report summarizes the proposals for the operation of the particle accelerators radiation safety requirements in Finland. Some of the proposals concern other parts of the accelerator facility than the use of the accelerator. These parts, such as hot cells, are essential part of the use of accelerator for research and production of radiopharmaceuticals.

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
1 SELVITYSTYÖN TARKOITUS	7
2 KATTAVUUS	8
3 HIUKKASKIIHDYTTIMET SUOMESSA	9
3.1 Elektronikiihdyttimet	9
3.2 Syklotronit	9
3.3 Läpivalaisukiihdyttimet	9
3.4 Lineaarikiihdyttimet	9
3.5 Terveysthuollon kiihdyttimet	9
4 HIUKKASKIIHDYTTIMISTÄ YLEISESTI	10
4.1 Kiihdyttimien aiheuttama ionisoiva säteily	10
5 SÄTEILYSUOJAUKSET KIIHDYTTIMILLÄ	12
5.1 Suojamateriaalit	12
5.1.1 Maa-aines	13
5.1.2 Betoni	13
5.1.3 Muut vetypitoiset suojat	13
5.1.4 Teräs	13
5.1.5 Erityismateriaalit	13
5.1.6 Tekniset ratkaisut	14
5.2 Kulkuaukot ja läpiviennit	14
6 SÄTEILYTURVALLISUUSJÄRJESTELMÄ	15
6.1 Riskien arviointi	15
6.2 Kulunhallintajärjestelmä	15
6.3 Säteilynhallintajärjestelmä	16
6.3.1 Passiiviset järjestelmät	17
6.3.2 Aktiiviset järjestelmät	17
7 SÄTEILYSUOJELUOHJELMA	18
7.1 Toiminnallinen säteilyturvallisuus	18
7.1.1 Alueiden ja työntekijöiden luokittelu sekä kulunhallinta	18
7.1.2 Henkilökunnan annostarkkailu	18
7.1.3 Säteilymittaukset	19
7.1.4 Säteilytyön ohjaus ja valvonta	19
7.1.5 Tuotetun radioaktiivisuuden hallinta	19
7.1.6 Mittalaitteistot	20
7.1.7 Radioaktiivisen materiaalin, lähteiden ja jätteiden hallinta	20
7.1.8 Kiihdyttimen ympäristön radiologinen suojaaminen	20
7.1.9 Laitoksen puhdistus- ja käytöstäpoistosuunnitelma	21
7.2 Organisaatio	21
7.3 Kiihdyttimien huolto	21
7.4 Varautuminen poikkeaviin tapahtumiin	21

7.5	Laitoksen rakenteet	22
7.6	Turvalaitteet	22
7.7	Radioaktiivisten jätteiden käsittely	23
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	24
9	EHDOTUKSIA VIRANOMAISVAATIMUKSIKSI SUOMEEN	25
9.1	Henkilöstön pätevyys	25
9.2	Riskien arviointi	25
9.3	Säteilyturvallisuusjärjestelmät	25
9.3.1	Turvakytkimet (Interlock)	25
9.3.2	Suojaukset	26
9.3.3	Varoitusvalot ja -äänimerkit	26
9.3.4	Muita turvallisuusvaatimuksia	26
9.3.5	Ilmanvaihtojärjestelmä	27
10	VIITTEET	28
11	KIRJALLISUUTTA	29

1 Selvitystyön tarkoitus

Nykyiset ST-ohjeet eivät suoraan käsittele isotoopituotannossa ja tutkimuskäytössä olevien hiukkaskiihdyttimien käyttöä. Näiden toimintojen säteilyturvallisuutta on valvottu soveltamalla muita ST-ohjeita ja yleisesti hyväksytyjä kansainvälisiä suosituksia (mm. IAEA).

Selvitystyön tarkoituksena on laatia yhteenveto keskeisistä turvallisuusnäkökulmista ja -vaatimuksista hiukkaskiihdyttimien käytössä. Selvityksen perusteella arvioidaan tarve hiukkaskiihdyttimien käyttöä koskeville säteilyturvallisuusvaatimuksille Suomessa.

2 Kattavuus

Selvitystyö on rajattu käsittelemään pääasias-
sa hiukkaskiihdyttimiä, jotka sopivat Persico et
al. 1968 -julkaisussa esitettyyn määritelmään:
”Hiukkaskiihdyttimet ovat laitteita, jotka on ra-
kennettu kiihdyttämään varattuja hiukkasia niin
korkeisiin kineettisiin energioihin, että niillä voi-
daan aikaansaada ydinreaktioita”. Selvitystyön tu-
loksia voidaan soveltaa myös kiihdyttimiin, joita ei
ole rakennettu tarkoituksena saada aikaan ydin-
reaktioita, mutta jotka saavat aikaan varatuille
hiukkasille yli 5 MeV:n kiihdytysenergian. Nämä
hiukkaset voivat ydinreaktioiden kautta synnyt-
tää neutroneita, jotka voivat aktivoida rakenteita.
[2]

EU:n uudessa BSS-direktiivissä (2013/59/
EURATOM) on määritelty kiihdytin seuraavasti:
”Kiihdyttimellä tarkoitetaan laitetta tai laitteis-
toa, jossa hiukkasia kiihdytetään siten, että syntyy
ionisoivaa säteilyä, jonka energia on suurempi
kuin 1 megaelektronivoltti (MeV)”. [8]

Selvityksessä ei käsitellä kaikkein suurimpia

kiihdyttimiä, koska tällaisia ei ole Suomessa ja
on epätodennäköistä, että sellaisia oltaisiin lä-
hiaikoina rakentamassa Suomeen. Selvitystyö ei
myöskään kata pieniä elektronikiihdyttimiä ja io-
ni-istuttimia, joita Suomessakin on käytössä muu-
tamia.

Tässä selvityksessä tarkastellaan eri lähteistä
peräisin olevia kiihdyttimiin liittyviä säteilytur-
vallisuusvaatimuksia ja -suosituksia. Lähteinä on
käytetty mm. muiden maiden kansallisia vaati-
muksia ja IAEA:n suosituksia. Selvityksessä ei
tarkastella kiihdytinlaitoksiin liittyvien ilmapääs-
töjen mallintamista ja niiden perusteella arvioita-
via säteilyaltistuksia.

Selvityksen lopussa kuvataan ehdotukset
kiihdyttimien säteilyturvallisuusvaatimuksik-
si Suomeen. Osa esitetyistä ehdotuksista koskee
myös kiihdytinlaitoksen muita osia kuin suoraan
itse kiihdytintoimintaa, kuten lyijykaappeja (hot
cell), vaikka niitä ei tässä selvityksessä muuten
käsitellä.

3 Hiukkaskiihdyttimet Suomessa

Suomessa on käytössä teollisuuden ja tutkimuksen toimialoilla yhteensä 21 hiukkaskiihdytintä. Lisäksi läpivalaisukäytössä on 6 fotonikiihdytinlaitteistoa. Terveystenhuollon sektorilla on käytössä 45 sädehoitokiihdytintä.

3.1 Elektronikiihdyttimet

Teollisuuden ja tutkimuksen toimialoilla on käytössä yhteensä kuusi elektronikiihdytintä. Näistä viisi on käytössä pääasiassa tuotantotoiminnassa ja yhtä käytetään tutkimukseen. Kiihdyttimiä käytetään esimerkiksi muovikalvojen käsittelyyn. Näiden elektronikiihdyttimien tuottamien elektronien kiihdytysenergiat vaihtelevat välillä 175–300 keV.

3.2 Syklotronit

Suomessa on käytössä yhdeksän syklotronia, joista suurinta osaa käytetään radionuklidien tuottamiseen diagnostisten radioaktiivisten lääkkeiden valmistamiseksi. Osa syklotroneista on myös tutkimuskäytössä. Tyypillisesti näillä syklotroneilla kiihdytetään protoneita 10–20 MeV:n energia-alueella. Suurimmalla kiihdyttimellä voidaan kuitenkin saavuttaa protoneille jopa 90 MeV:n kiihdytysenergia.

3.3 Läpivalaisukiihdyttimet

Läpivalaisuun käytettäviä kiihdytinlaitteistoja Suomessa on kuusi kappaletta. Näitä fotonikiihdyttimiä käytetään erilaisten kohteiden tarkastamiseen, esimerkiksi ajoneuvojen läpivalaisuun. Läpivalaisuun käytettävien kiihdyttimien fotonien kiihdytysjännitteet ovat välillä 4–9 MV.

3.4 Lineaarikiihdyttimet

Tutkimuskäyttöön on asennettu kuusi lineaarikiihdytintä. Näillä voidaan kiihdyttää mm. protoneita energioille 3,4–10 MeV. Kaksi näistä tutkimuskäytössä olevista lineaarikiihdyttimistä on niin sanottuja ioni-istuttimia, joiden kiihdytysjännite on 200–250 kV.

3.5 Terveystenhuollon kiihdyttimet

Terveystenhuollon sektorilla on käytössä 45 sädehoitokiihdytintä yhteensä 13 syöpähoitokeskuksessa. Näiden kiihdyttimien fotonien kiihdytysjännitteet vaihtelevat välillä 6–18 MV ja elektronien kiihdytysenergiat välillä 4–20 MeV.

4 Hiukkaskiihdyttimistä yleisesti

Hiukkaskiihdyttimien tärkeimmät ominaisuudet säteilysuojelullisesta näkökulmasta ovat kiihdytysenergia ja hiukkassuihkun keskimääräinen teho. Näiden ominaisuuksien perusteella määräytyvät mm. syntyvän säteilyn ominaisuudet ja kiihdyttimen käytöstä aiheutuva aktivaatio. [2]

Hiukkaskiihdyttimet voidaan jakaa sykliisiin ja lineaarikiihdyttimiin. Lineaarikiihdyttimillä käytettävissä oleva virta on yleisesti suurempi kuin syklisillä kiihdyttimillä. Tämä tarkoittaa, että samalla kiihdytysenergialla on käytettävissä enemmän tehoa. Syklisiä kiihdyttimiä ovat esimerkiksi syklotronit, betatronit, synkrotronit ja mikrotronit. Elektronikiihdyttimet, joiden kiihdytysenergia on pienempi kuin 30 MeV, eivät yleisesti saa aikaan sellaisia määriä ydinreaktioita, että niiden synnyttämä radioaktiivisuus olisi säteilysuojelullinen ongelma. [2]

Kiihdytinosan lisäksi laitteissa on järjestelmä, jolla kiihdytetty hiukkaset ohjataan kohteeseensa. Tämä järjestelmä koostuu hiukkassuihkun fokuksentilalaitteista (kvadrupoli- ja sekstupolimagneetit), hiukkassuihkun ohjauslaitteista (dipolimagneetit) ja laitteista, jotka rajoittavat hiukkassuihkun kokoa (kollimaattorit).[2]

4.1 Kiihdyttimien aiheuttama ionisoiva säteily

Hiukkaskiihdyttimien aiheuttamaa ionisoivaa säteilyä on tarkasteltava primäärisäteilyn (kiihdytetty hiukkassuihku) lisäksi myös sekundäärisen säteilyn osalta. Sekundääristä säteilyä syntyy, kun primäärinen säteily vuorovaikuttaa väliaineen kanssa. Sekundäärisen säteilyn intensiteettiä kuvataan lähde-termillä (source term). Matala- tai keskiennerginen kiihdytetty hiukkassuihku voi synnyttää seuraavassa kuvattua sekundääristä säteilyä [2]:

- jarrutussäteily
- karakteristinen röntgensäteily
- suora gammasäteily

- neutronit, varatut hiukkaset, ionit
- viritystilojen purkaantuminen viiveellä.

Elektronikiihdyttimillä tärkeimmän säteilysuojelullisen haasteen muodostaa fotonisäteily. Kiihdyttimien, joilla kiihdytetään protoneita ja muita positiivisia ioneja, säteilysuojelullinen haaste liittyy useimmiten hadronien syntyyn. Tyypillisimpiä näistä hadroneista ovat neutronit ja protonit. [2]

Kiihdyttimillä syntyvään säteilyyn vaikuttaa kiihdyttimien kiihdytysominaisuuksien lisäksi mm. säteilytettävän kohtion materiaali sekä suojaukset kiihdyttimen ja kohtion ympärillä. [2]

Elektronikiihdyttimillä kiihdytettävät elektronit muodostetaan tyypillisesti katodilla kuumalta filamentilta. Joissain tapauksissa kiihdytettävät elektronit saadaan ionilähteen plasmasta. Useimmissa laitteissa elektronisuihku johdetaan kiihdyttimen vakuuutilasta ohuen kohtiokalvon tai -ikkunan läpi säteilytettävään kohtioon, joka on normaalissa huoneilmassa. Elektronien maksimikantama metreissä normaalissa huoneilmassa on karkeasti noin viisinkertainen verrattuna sen energiaan megaelektronivolteissa. Elektronit siroavat kaikista väliaineista, joihin ne törmäävät (myös ilmasta) ja voivat sen vuoksi aiheuttaa säteilysuojelullisen ongelman. Konservatiivisena oletuksena sironneiden elektronien energiaa voidaan pitää samana kuin kiihdytettyjen elektronien energiaa. Suurimman säteilysuojelullisen uhan sekundäärisestä säteilystä muodostaa jarrutussäteilystä syntyvä fotonisäteily. Elektronien energian kasvaessa yhä suurempi osuus niiden energiasta muuttuu jarrutussäteilyksi lämmön sijasta elektronien törmätessä väliaineeseen (esim. kohtioon). Elektronisuihkut voivat synnyttää myös neutronia fotodydinreaktiolla osuessaan väliaineeseen. Tyypillisesti elektronien energian on oltava tätä varten vähintään 9–20 MeV riippuen väliaineen tiheydestä, johon elektronisuihku osuu. [2, 3]

Protonien kiihdyttämiseen voidaan käyttää lineaarikiihdyttimiä, syklotroneja ja synkrotroneja. Ihmisten joutuminen primääriseen protonisuihkuun tulee estää kaikissa tilanteissa. Pienillä energioilla (p,n)-reaktio on tärkein neutronia synnyttävä reaktio. Kevyillä alkuaineilla (p,n)-reaktion kynnysenergia on noin 1–2 MeV. Protonisäteilytykseen käytettävien kiihdyttimien osalta tulee kiinnittää huomiota erityisesti seuraaviin asioihin:

- henkilöiden suojaaminen suoralta säteilyltä
- laitteiston rappeutuminen/kuluminen säteilyn johdosta
- laitteistojen ja tilojen aktivoituminen ja niiden aiheuttama säteilyannos henkilökunnalle
- radioaktiivisen jätteen syntyminen.

Kun säteilytykseen käytetään kevyitä ioneja, esimerkiksi deuteroneja tai alfa-hiukkasia, on huomioitava erityisesti neutronien tuotto reaktioilla (d,n) ja (α ,n). Raskailla ioneilla käytetään energian yksikkönä kineettistä energiaa jaettuna atomi-

massaluvulla (MeV amu^{-1}). [2]

Kaikki kiihdyttimet, jotka tuottavat raskaita ioneja tai neutroneita ja joiden kineettinen energia on suurempi kuin 10 MeV amu^{-1} , tuottavat joko suoraan tai välillisesti radioaktiivisia aineita. Joissain tapauksissa myös huomattavasti pienemmillä kineettisillä energioilla syntyy radioaktiivisia aineita eksotermisten ydinreaktioiden kautta joko suoraan tai syntyvän neutronisäteilyn kautta. Elektronikiihdyttimillä aktivoituminen tapahtuu epäsuorasti neutronien ja muiden elektronisäteilytyksessä syntyvien hiukkasten ja ionien välityksellä. [2]

Pienen energian protoni- ja ionikiihdyttimillä ($E < 30 \text{ MeV}$) suorat ydinreaktiot ovat melko hyvin tunnettuja, esim. (p, γ)- tai (p,n)-reaktiot. Ne ovat pääasiassa endotermisiä ydinreaktioita, joilla on tunnettu kynnysenergia. Kun kineettinen energia kasvaa, niin myös mahdollisten ydinreaktioreittien määrä kasvaa, kuten myös tuotettujen radionuklidien määrä. [2]

5 Säteilysuojaukset kiihdyttimillä

Säteilysuojaukset suunnitellaan ja rakennetaan erityisen huolellisesti, koska jälkeenpäin tehtävät korjaukset rakenteellisissa suojauksissa ovat kalliita. Rakenteellisten suojausten suunnittelussa on myös hyvä huomioida mahdollisuuksien mukaan tulevaisuuden laitehankinnat ja näiden laitteiden erilaiset säteilyominaisuudet. [2]

Säteilysuojien riittävät paksuudet on syytä laskea käyttäen Monte Carlo -laskentaa tai muita vastaavia mallinnusohjelmia. Säteilysuojausten tehokkuutta voi myös arvioida käyttämällä kymmenysosa- tai puoliintumispaksuuksia. Tällöin on syytä huomioida erot kymmenysosa- ja puoliintumispaksuuskerrosten välillä. Nämä tasaantuvat mitä syvemmälle väliaineeseen säteily etenee. Näitä arvoja eri materiaaleille sekä säteilyn laadulle ja energioille löytyy mm. DIN-standardeista. Protonikiihdyttimille neutronisuojaus määrää vaadittavan suojauksen paksuuden käytännössä aina 400 MeV:n kiihdytysenergiaan asti, jos suojaukseen käytetään betonia. [2]

Elektronisuihkun osuessa raskaaseen kohtiomateriaaliin elektronikiihdyttimillä, joiden kiihdytysenergia on välillä 1–50 MeV, syntyvä fotonisäteily suuntautuu melko tasaisesti joka suuntaan. Kiihdytysenergian kasvaessa fotonisäteily muuttuu anisotrooppisemmaksi ja suuntautuu pääasiassa suoraan elektronisuihkun suuntaisesti. Mahdollisesti syntyvä neutronisäteily suuntautuu elektronien kiihdytysenergialla 1–100 MeV isotrooppisesti. Fotonisäteilyä voidaan vähentää tehokkaasti paikallisilla säteilysuojauksilla esimerkiksi kohtion ja kollimaattoreiden ympärillä. Nämä korkean järjestysluvun omaavat suojaukset (esim. lyijy) pienentävät neutronien energiaa, mutta eivät niiden määrää. Jos elektronisäteilytystä käytetään sterilointilaitoksessa tai vastaavassa sovelluksessa, jossa säteilytysvirta on korkea, huomioidaan myös kohdemateriaaleissa syntyvä röntgensäteily. Jos elektronikiihdyttimen

suojaahuoneen seinät on rakennettu betonista fotonisäteilyn vuoksi, ovat ne usein riittävä suojauksena myös mahdollisesti syntyvälle neutronisäteilylle. Jos suojauksena on käytetty esimerkiksi lyijyä tai terästä, niin riittävä suojaus neutronisäteilylle arvioidaan erikseen. Lisäksi neutronisuojaukseen on syytä kiinnittää erityisesti huomiota suojaahuoneen läpivientien ja kulkemista varten rakennettujen sokkeloiden osalta. Myös sokkeloiden oven neutronisuojaukseen on syytä kiinnittää huomiota, jos elektronien kiihdytysenergia on suurempi kuin 10 MeV. Jos suojaahuoneen katto on rakennettu ohuemmaksi kuin muut rakenteet, on neutronien taivassirontaa syytä tarkastella tarkemmin. [2]

Kiihdyttimien suojausta laskettaessa huomioidaan suunta- ja oleskelutekijät sekä laitteen työkuormitus. Suojausta määritettäessä voidaan yleensä tarkastelupisteiksi ottaa suojaahuoneen ulkopuolella 30 cm:n etäisyys seinästä, yläpuolella 50 cm:n etäisyys lattiasta ja alapuolella 2 m:n etäisyys alapuolisen huoneen lattias- ta [2]. Säteilyturvakeskuksen ohjeessa ST 1.10 ”Säteilylähteiden käyttötilojen suunnittelu” tarkastelupisteiksi on annettu suojaahuoneen ulkopuolella 30 cm etäisyys seinästä, yläpuolella 30 cm:n etäisyys lattiasta ja alapuolella 1,5 m:n etäisyys alapuolisen huoneen lattiasta. [9]

Protonikiihdyttimillä suojaus neutronisäteilyä vastaan on tärkein säteilyturvallisuustekijä. Neutroneita syntyy protonien vuorovaikutuksessa kiihdyttimien eri osien ja suojausten kanssa. [2]

5.1 Suojamateriaalit

Säteilysuojauksena voidaan periaatteessa käyttää mitä tahansa materiaalia, kunhan sitä on riittävä määrä. Käytännön syyt kuitenkin usein rajoittavat materiaalit yleisesti rakentamisessa käytettyihin materiaaleihin, kuten betoniin, teräkseen tai maainekseen. [2]

5.1.1 Maa-aines

Maa-aines koostuu pääasiassa piidioksidista (SiO_2), joka tekee siitä tehokkaan suojan sekä foton- että neutronisäteilyä vastaan. Maa-aineksen vesipitoisuus parantaa sen ominaisuutta vaimentaa neutronisäteilyä. Maa-aineksen tyypistä riippuen sen tiheys vaihtelee välillä $1,7\text{--}2,2\text{ g cm}^{-3}$. Maa-aineksen suojauksena käytön hyvä puoli on se, että tällainen suoja on helppo rakentaa. Se on myös helppo purkaa, joten suojauksena käytetyn maa-aineksen tilaa on kontrolloitava tarkasti. [2]

5.1.2 Betoni

Betonisuojaukset voidaan joko valaa paikalla valmiiksi tai rakentaa valmiista betoniharkkoista. Betoniharkkojen avulla voidaan myös rakentaa väliaikaisia suojauksia kokeellisia töitä varten tai helposti purettavia suojauksia huoltotöitä varten. Tavallisen betonin tiheys on noin $2,35\text{ g cm}^{-3}$. Betoniin voidaan lisätä raskaita lisäaineita, kuten baryyttia tai rautamalmia, jolloin sen tiheys voi olla jopa $4,5\text{ g cm}^{-3}$. Lisäaineita käytettäessä on syytä huomioida niiden mahdollinen aktivoituminen neutronisäteilyn johdosta. Neutronisuojausta määritettäessä on myös syytä huomioida eri betonilaatujen vesipitoisuus. Betonissa voi syntyä neutroniaktivaation johdosta esimerkiksi ^{24}Na :ää. Joissain sovelluksissa kannattaa käyttää tämän vuoksi sellaista betonia, jonka natriumpitoisuus on mahdollisimman alhainen. Myös betonin tukirauδοitukset aktivoituvat neutronisäteilyn vaikutuksesta, joten niiden käyttöä on syytä välttää varsinkin lähellä suojahuoneen pintakerroksia. [2]

5.1.3 Muut vetypitoiset suojat

Polyeteeni, $(\text{CH}_2)_n$, on erittäin tehokas neutronisuoja sen korkean vetypitoisuuden ja kohtuullisen suuren tiheyden johdosta ($0,92\text{ g cm}^{-3}$). Polyeteeniin voidaan lisätä booria, joka kilpailee vedyn kanssa termisten neutroneiden kaappauksesta. Vedyn kaapatessa termisen neutronin syntyy $2,2\text{ MeV}$ fotoneita. [2]

Vesi on vetypitoinen ja halpa suojausmateriaali. Sen käyttöön liittyy kuitenkin ongelmia, joita ovat esimerkiksi vesivuodot ja ruostuminen. Lisäksi veteen olisi hyvä lisätä booria, jotta $2,2\text{ MeV}$ fotoneita ei syntyisi vedyn kaapatessa termisiä neutroneita. Käytännössä vesisuojausten lisäksi tarvitaan usein suojaus näitä fotoneita vastaan. [2]

Myös puuta voidaan käyttää neutronisuojaus-

sena. Puun ongelmat liittyvät usein materiaalin epähomogenisuuteen ja säteilyn siinä aiheuttamiin vaurioihin. [2]

Lisäksi parafiiniä, muoveja ja orgaanisia öljyjä voidaan käyttää neutronisuojoina. Nämä kaikki tarvitsevat ympärilleen tukirakenteen, joka heikentää niiden käyttömahdollisuuksia pysyvissä suojusrakenteissa. Lisäksi kaikki nämä materiaalit ovat erittäin paloherkkiä, kuten puu ja polyeteenikin, ja niihin tarvitsee lisätä palonsuojaineita. [2]

5.1.4 Teräs

Teräksen suuri tiheys ($7,0\text{--}7,8\text{ g cm}^{-3}$) ja kohtuullinen hinta kuuluvat sen hyviin ominaisuuksiin suojamateriaalina. Huonona puolena voidaan pitää sen erittäin huonoa suojasta neutroneita vastaan. Joissain tapauksissa, kuten sädehoitokiihdyttimissä, voidaan käyttää teräksen ja betonin yhdistelmää kiihdytintilan suojaukseen. Tällöin tehokkain suojaus saavutetaan, kun terässuojaus (tai lyijysuojaus) on kiihdyttimeen päin ja betoni sen ulkopuolella. Teräksen lisäaineiden pitoisuudet on syytä ottaa huomioon, jos terästä käytetään suojauksena. Erityisesti terästä, joka sisältää edes ppm-tasoisia määriä kobolttia, on syytä välttää. [2]

5.1.5 Erityismateriaalit

Korkean järjestysluvun alkuaineita, kuten tantaalia tai platinaa, voidaan käyttää säteilykeilan pysäyttäjinä, kun ionien energia on alle 5 MeV . Tällöin nämä toimivat hyvänä suojana fotoneita vastaan ja vähentävät myös neutroneiden tuottoa. [2]

Lyijyä käytetään useissa tapauksissa suojauksena sen korkean tiheyden ($11,3\text{ g cm}^{-3}$) ja hyvän saatavuuden vuoksi. Lyijynkin osalta on syytä kiinnittää huomiota sen mahdollisiin lisäaineisiin. Esimerkiksi antimonista voi syntyä neutronisäteilytyksen johdosta ^{122}Sb :ta ja ^{124}Sb :ää. Lyijyä on saatavilla myös useissa erilaisissa valmiissa tuotteissa. Lyijypeitteitä voidaan käyttää esimerkiksi kiihdyttimen huoltotöissä suojauksina. [2]

Volframi on sen suuren tiheyden vuoksi ($17\text{--}18\text{ g cm}^{-3}$) erinomainen suojamateriaali, joskin kallis sellainen. Sen korkean sulamispisteen ($3\,410\text{ °C}$) vuoksi siihen voidaan myös kohdistaa suora säteilykeila. [2]

Uraania voidaan käyttää suojana sen korkean tiheyden (19 g cm^{-3}) ja kohtuullisen korkean su-

lampsipisteen (1 133 °C) johdosta. Uraani ei kuitenkaan välttämättä sovellu suojaukseen tiloissa, joissa on korkea neutronivuo, sen fissioituvuuden vuoksi. Lisäksi uraani luokitellaan ydinmateriaaliksi ja sen hallussapitoa säädelään ydinenergiailailla. Uraanin pinnalle muodostuu uraanioksidia, kun uraani joutuu tekemisiin ilman kanssa. Uraanioksidikerros irtoaa uraanin pinnalta helposti ja on sekä radioaktiivinen että toksinen. [2]

Aineet, joilla on matala järjestysluku, kuten alumiini ja tavallinen betoni, toimivat hyvänä säteilysuojana elektronisäteilylle, kun halutaan välttää röntgensäteilyn syntyminen väliaineessa. [2]

5.1.6 Tekniset ratkaisut

Putkien ja johdotusten läpivientien osalta voidaan lisäsuojauksena läpivienneissä käyttää esimerkiksi teräsvillaa röntgensäteilylle ja neutronisäteilylle kipsiä tai parafiniä, joihin on lisätty booria. [2]

Suojaseiniin voidaan lisätä erilaisia suojakerroksia. Esimerkiksi elektronisäteilyn suojaseinäissä tuottamaa röntgensäteilyä voidaan vähentää lisäämällä seinän sisäpintaan kerros matalan järjestysluvun ainetta. Termisiä neutroneja voidaan taas vähentää lisäämällä kerros booripitoista materiaalia suojahuoneen seinien ulkopuolelle. [2]

5.2 Kulkuaukot ja läpiviennit

Kiihdytintiloja ei käytännössä voida rakentaa ilman kulkuaukkoja tai läpivientejä. Läpivientien säteilysuojausten tehoa on hankala arvioida, koska niissä on esimerkiksi kaapeleita ja vesiputkia. Tavoitteena on kuitenkin pidettävä, että kulkuaukkojen ja läpivientien suojaustehokkuus on

yhtä hyvä kuin muiden suojarakenteiden. Tämä voi kuitenkin olla käytännössä vaikea toteuttaa. Seuraavia suunnitteluperusteita on syytä noudattaa:

- Kaikki läpiviennit rakennetaan siten, ettei suora säteilykeila voi ikinä suuntautua läpiviennin suuntaisesti ja ettei merkittävä sekundaärinen säteily pääse kulkemaan suoraan suojaamattomana läpivientä pitkin.
- Sokkeloiden suojaseiniä yhteispaksuuden on syytä olla joka kohdassa vähintään yhtä suuri kuin tarvittava seinän paksuus olisi ilman sokkeloa.

Jos kulkuaukot rakennetaan ilman sokkeloa, niiden ovien tulee olla yhtä tehokkaita säteilysuojaukseen kuin muiden rakenteiden. Koska suojaovista tulee raskaita, on niiden käytössä syytä huomioida henkilökunnan mahdollinen oven väliin jääminen. Lisäksi ovi on syytä tarvittaessa pystyä avaamaan sisäpuolelta myös tilanteessa, jossa sähköä ei ole käytössä. Suojaovien ja seinien väliset raot on syytä rakentaa mahdollisimman pieniksi ja sillä tavalla, ettei suoraa säteilykeilaa voida suunnata näihin rakoihin. Ovien on syytä olla limittäin lattia- ja seinärakenteiden kanssa siten, että oven rakenne ylittää seinän tai lattian ja ovirakenteen välisen raon vähintään kymmenkertaisella raon leveydellä. Yhdessä ovenssa voi olla useampi limittäinen kohta. Oven alapuolelle lattian pintaan saattaa olla tarpeellista lisätä kerros korkean järjestysluvun omaavaa ainetta fotonien absorboimiseksi tai matalan järjestysluvun omaavaa ainetta neutronien absorboimiseksi. [2]

6 Säteilyturvallisuusjärjestelmä

Altistuminen säteilylle kiihdytinlaitoksen ympäristössä estetään säteilyturvallisuusjärjestelmällä (Radiation safety system, RSS). Tehokas säteilyturvallisuusjärjestelmä koostuu seuraavista asioista:

1. rakenteelliset suojaukset
2. hallinnolliset keinot
3. henkilökohtaiset suojavälineet (mm. hengityssuojaimet, suojavaatteet). [6]

Riittävä säteilyturvallisuustaso pyritään saavuttamaan sekä rakenteellisin suojauksin, että hallinnollisin keinoin. Henkilökohtaisia suojavälineitä käytetään, jos rakenteelliset suojaukset ja hallinnolliset keinot eivät riitä toteuttamaan riittävää turvallisuustasoa.

Säteilyturvallisuusjärjestelmään kuuluu kaksi toisiaan täydentävää järjestelmää: kulunhallintajärjestelmä (Access control system, ACS) ja säteilynhallintajärjestelmä (Radiation control system, RCS). Säteilyturvallisuusjärjestelmä mitoitetaan mahdollisten riskien perusteella. Esimerkiksi pieni täysin suojattu pöytämallinen kiihdytin ei tarvitse kulunhallintajärjestelmää. [4]

Säteilyturvallisuusjärjestelmän on syytä olla luotettava, vikaantuessaan turvallinen (fail-safe) sekä suojattu tahattomilta tunkeutumisilta ja muutoksilta. Säteilyturvallisuusjärjestelmän laadunvarmistukseen on syytä luoda tarkistusohjelma, jonka kattavuus ja laajuus riipuvat toimintaan liittyvistä säteilyriskeistä. Kiihdytinlaitoksella on syytä olla järjestelmät, joilla työntekijöitä, väestöä ja ympäristöä suojataan ylimääräiseltä säteilyaltistukselta. Näitä järjestelmiä voivat olla esimerkiksi paikalliset säteily-suojat, annosnopeuteen perustuva kiihdytinhalliin pääsyn estävä turvakytin ja päästömonitorointi. [4]

6.1 Riskien arviointi

Säteilyturvallisuusjärjestelmää suunniteltaessa otetaan huomioon tehty riskien arviointi. Riskien

arviointiin voidaan käyttää esimerkiksi FMEA- (failure modes and effects analysis) tai HAZOP- menetelmiä (hazard and operability analysis). Arvioitaessa mahdollisen onnettomuuden seurauksia työntekijöille ja väestölle, arviot tulisi tehdä siten, että valitut turvajärjestelmät eivät ole käytössä. Riskien arvioinnin jälkeen harkitaan keinot, joilla työntekijöitä ja väestöä voidaan suojella.

6.2 Kulunhallintajärjestelmä

Valvonta-alueille ja muille alueille, joissa annosnopeus ylittää ennalta määrätyt arvot, pääsyä rajoitetaan kulunhallintajärjestelmällä (ACS). Yksinkertaisimmillaan kulunhallinta voi olla alueen rajaaminen lippusiimalla ja asianmukaisilla varoitusmerkeillä. Kulunhallintajärjestelmän suunnittelun peruseriaatteen ovat luotettavuus, kunnossapidettavuus, testattavuus ja yksinkertaisuus. Kulunhallintajärjestelmä koostuu seuraavista osista:

Varoitusmerkit ja -valot. Työntekijöille annetaan ilmoitus kiihdyttimen kolmesta eri tilasta: Laite on pois päältä, laite on toimintavalmis (valmis tuottamaan säteilyä) ja laite on päällä. Varoitusmerkkien ja -valojen väreinä on syytä käyttää keltaista ja punaista. Varoitusvalojen yhteydessä on syytä olla valojen tarkoitusta selventävä teksti. Varoitus annetaan tarpeen mukaan varoitusvalon lisäksi myös äänimerkillä, ennen kuin alueelle tuotetaan säteilyä. Alueilla, missä annosnopeudet voivat nousta suuriksi, on syytä olla hätäpysäytyskytkimet. [4]

Suojaukset. Minimissään alue voidaan suojata narulla ja asianmukaisilla varoitusmerkeillä. Tällaisen suojauksen tarkoituksena on lähinnä merkitä varoetäisyys, ei estää pääsyä alueelle. Järeämmillä suojauksilla, kuten kiihdytinhallien suojaseinillä, on säteilysuojuksena toimimisen lisäksi tarkoitus myös estää tahaton tai luvaton pääsy alueelle. [4]

Ovet ja portit. Henkilöliikenteen ovet ja portit alueelle, jossa on korkea annosnopeus, pidetään joko lukittuina tai ne suojataan turvakytkimin, jotka estävät säteilyn tuoton ovien tai porttien ollessa auki. Korkeimman säteilyriskin alueille ovissa ja porteissa on syytä olla sekä lukitus että turvakytkimet. Lukituilta alueilta on syytä olla aina pääsy ulos hätätilanteiden varalta. Kun alueet on lukittu säteilyriskin vuoksi, ne pidetään lukittuina, kunnes riski on jälleen matala esim. avainhallinnan tai automaattisen lukitusjärjestelmän avulla. Ovien lähellä on syytä olla selkeät merkinnät lukitun alueen tilasta. [4]

Sulkualue. Alueet, joilla annosnopeus voi nousta suurehkoksi, tarkistetaan ennen säteilytyksen aloittamista siltä varalta, että sinne ei jää henkilöitä säteilytyksen ajaksi. Alueen tarkistamiseksi on syytä luoda luotettava järjestelmä, johon voivat kuulua ovien/porttien lukitukset, varoitusvalot ja -merkkiäänät sekä tarkistuskytkimet (last man out -kytkimet). Järjestelmän tulisi toimia niin, että kiihdytintä ei voida käynnistää, jos alueen tarkistusta ei ole tehty vaaditulla tavalla. Joissain tilanteissa (esim. yhden huoneen laitoksissa) videovalvontajärjestelmä voi olla riittävä ratkaisu varmistamaan, että tilassa ei ole henkilöitä. [4]

Säteilytyksen estolaitteilla on kyky estää säteily tietyillä alueilla. Tällaisia laitteiston osia voivat olla esimerkiksi virransyöttö RF:lle tai injektorille tai suihkulinjaan asennettu elektromagneettisuljin, jonka ohitse hiukkassuihku ei pääse kulkemaan, kun magneetti on pois päältä. [4]

Turvakytkimet (interlock) varmistavat, että säteilytyksen estolaitteet ovat päällä, kunnes säteilytys on turvallista käynnistää. Turvakytkimiin perustuvat järjestelmät on syytä varmistaa toisella täysin riippumattomalla järjestelmällä tiloissa, joissa voi olla korkea annosnopeus. Lisäksi muissakin tiloissa varmentava järjestelmä on hyvä olla olemassa. Yksi ovi tai hiukkassuihkun suljin varustettuna kahdella mikrokytkimellä ja logiikkaketjulla on hyväksyttävä esimerkki riippumattomasta varmennuksesta. Tietokoneistettujen logiikkajärjestelmien, kuten ohjelmoitavien logiikkaohjaimien (PLC), on syytä täyttää samat vaatimukset kuin rele-pohjaisten järjestelmien. Lisäksi erityisesti huomiota on kiinnitettävä mm. siihen, että PLC-tietokoneet on varattu ainoastaan säteilyturvallisuusjärjestelmälle ja että järjestelmän toiminta on validoitu asianmukaisesti ennen käyt-

töönottoa. [4]

Turvakytkimillä varustettu kulunhallintajärjestelmä arvioidaan ja hyväksytään kokonaisuudessaan ennen käyttöönottoa ja aina myös merkittävien muutosten jälkeen. Kaikki muutokset järjestelmässä kirjataan, arvioidaan ja hyväksytään. Lisäksi järjestelmän toiminta varmistetaan erillisen suunnitelman mukaisesti vähintään vuosittain. Joitain järjestelmän yksittäisiä osia (esim. ovien mikrokytkimet) saattaa olla tarpeen testata useammankin niiden vaurioherkkyyden tai kovien käyttöolosuhteiden vuoksi. [4]

6.3 Säteilynhallintajärjestelmä

Säteilynhallintajärjestelmän (RCS) tehtävänä on varmistaa, että miehitettyjen alueiden säteilytasot eivät ylitä odotettavissa olevia tasoja normaalin käytön tai poikkeavien tapahtumien aikana. Passiivisten säteilynhallintajärjestelmien käyttö on suositeltavampaa kuin aktiivisten. Passiivisia järjestelmiä ovat mm. suojaseinät ja aitaukset, jotka lisäävät massaa ja/tai etäisyyttä säteilylähteiden ja henkilöiden väliin. Aktiivisia järjestelmiä ovat taas mm. säteilysuihkon virtaan tai tilojen annosnopeuteen perustuvat turvakytkimet. Usein saattaa olla taloudellisesti kannattavaa yhdistää passiivinen ja aktiivinen järjestelmä esimerkiksi siten, että suojaseinät tarjoavat riittävän suojan normaaleissa käyttöolosuhteissa ja säteilymittareihin perustuvat turvakytkimet katkaisevat tarvittaessa säteilyn tuoton poikkeavissa säteilytilanteissa. [4]

Säteilynhallintajärjestelmän suunnittelussa on syytä huomioida se, että normaaleissa käyttöolosuhteissa työntekijöiden ja väestön suunnitellut annokset jäävät murto-osaan annosrajoista. Säteilyturvakeskuksen ohjeessa ST 1.10 ”Säteilylähteiden käyttötilojen suunnittelu” esitetään suojien laskentaperusteita. Väestön säteilysuojelussa on syytä ottaa huomioon suoralta säteilyltä suojaamisen lisäksi myös päästöt ilmaan ja mahdollinen pohjaveden aktivoituminen.

6.3.1 Passiiviset järjestelmät

Säteilyä voidaan vaimentaa lisäämällä suojauksia (massaa) tai etäisyyttä (esim. aitoja) säteilylähteen ja suojattavan kohteen väliin. Nämä niin sanotut passiiviset järjestelmät ovat aktiivisia järjestelmiä luotettavampia, koska ne eivät ole riippuvaisia kyvystään havaita mahdollinen säteilyvaarati-

lanne ja reagoida tilanteeseen. Laitoksella tulee ylläpitää suojausjärjestelyjä, joissa on huomioitu sekä normaalit käyttötilanteet että mahdolliset poikkeavat tapahtumat. Suojauslaskelmien tulee perustua todellisiin säteilyolosuhteisiin (maksimivirrat, kiihdyttävät ionit, kohtioasemat, jne.). Suojausten läpivienteihin (kaapelit, ilmastointi) sekä ovien ja seinien limittäisyyteen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Suojausten riittävyys varmistetaan säteilymittauksilla. Mittaukset on tehtävä riittävän herkillä mittalaitteilla. [4]

6.3.2 Aktiiviset järjestelmät

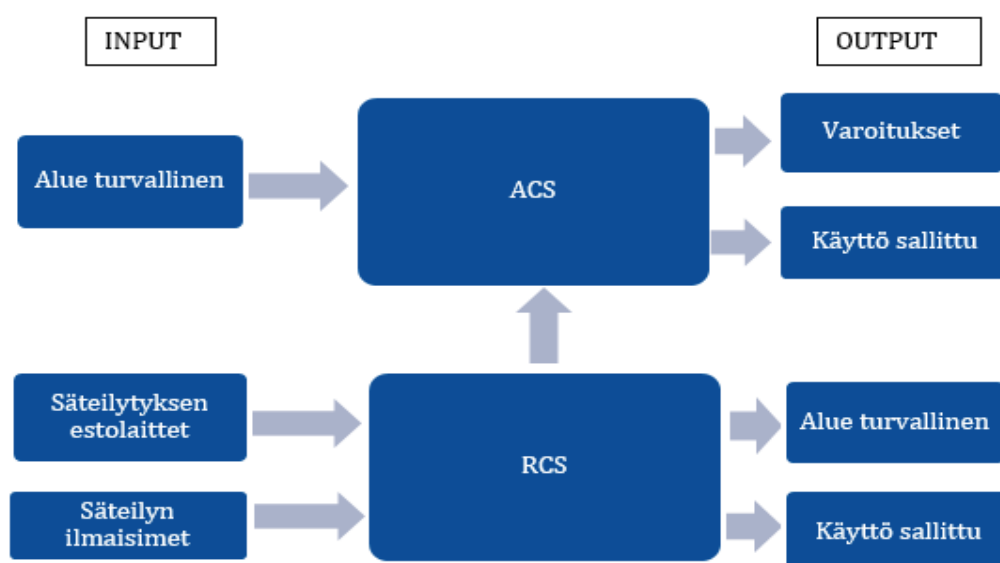
Aktiivinen säteilynhallintajärjestelmä tunnistaa hyväksymättömät käyttöolosuhteet (säteilysuihkun teho, kohonnut säteilytaso) ja rajoittaa sä-

teilyvaaraa (säteilysuihkun katkaiseminen tai säteilytason alentaminen). Yleensä järjestelmät käyttävät säteilysuihkun ja säteilytason turvakyt-kimiä (interlock) ja niihin ennalta asetettuja rajoja. Järjestelmien toiminta tulisi varmistaa säännöllisesti. [4]

Jos kiihdytinoperaattori voi ylittää säteilysuihkun sallitun virran tai energian arvon, käytössä tulisi olla järjestelmä, joka rajoittaa automaattisesti laitteen toimintaa sallitulle tasolle. Kohonneesta säteilytasosta annetaan varoitus operaattoreille ja henkilökunnalle. Jos säteilytaso ylittää kriittisen tason, järjestelmä rajoittaa automaattisesti laitteen toimintaa turvalliselle tasolle. Järjestelmän toiminta olisi syytä tarkistaa esimerkiksi säteilylähteen avulla. [4]

Taulukko. Esimerkkejä rakenteellisista suojauksista ja hallinnollisista keinoista. [7]

Rakenteelliset suojaukset	Hallinnolliset keinot
<ul style="list-style-type: none"> Säteilylähteiden suojaaminen Säteilylaitteiden turvakytkimet (Interlocks) pyritäessä tiloihin, joissa näitä laitteita käytetään Isolaattorien tms. käyttö, jolla vähennetään säteilyaltistusta tai kontaminaatiota 	<ul style="list-style-type: none"> Työntekijän poistaminen säteilytyöstä, jos hänen säteilyannoksensa on lähellä ennakoon asetettua selvitysraja/annosrajoitusta Säteilylle altistumisajan minimointi suunnittelemalla työ etukäteen Radionuklidien käsittely vain niille suunnitelluissa tiloissa käyttäen vain turvallisia menetelmiä Ylimääräisten henkilöiden pääsyn rajoittaminen valvonta- ja tarkkailualueelle



Kuva. Esimerkki kulunhallintajärjestelmästä (ACS) ja säteilynhallintajärjestelmästä (RCS) osana säteilyturvallisuuksjärjestelmää. [4]

7 Säteilysuojeluohjelma

Säteilysuojeluohjelmassa määritellään ionisoivasta säteilystä aiheutuvat riskit työntekijöille, väestölle ja ympäristölle. Säteilysuojeluohjelmassa määritetään ne keinot, joilla näitä riskejä voidaan hallita suunnittelun, rakentamisen, käyttöönoton, normaalin käytön, huoltojen ja käytöstäpoiston aikana. Säteilysuojeluohjelman laajuus määritetään toiminnan laajuuden ja mahdollisten säteilyn käyttöön liittyvien riskien perusteella. Tässä kappaleessa on kuvattu tarkemmin asioita, joita olisi syytä sisällyttää säteilysuojeluohjelmaan. Näitä asioita ovat muun muassa toiminnallinen säteilyturvallisuus, säteilyn käytön organisaatio, rakenteellisiin suojauksiin ja hallinnollisiin keinoihin liittyvien ratkaisujen suunnittelu ja asennukset sekä kiihdyttimen ja laitoksen toiminta. Säteilysuojeluohjelman ajantasaisuus on syytä arvioida säännöllisesti. [4]

Säteilysuojeluohjelman pohjana käytettävään riskien arviointiin tulisi liittää vähintään kuvaus laitoksesta, kiihdyttimestä, säteilykeilan ominaisuuksista, käyttötavoista, arvio säteilyvaaroista, kuvaus rakenteellisista ja hallinnollisista keinoista säteilyvaarojen havaitsemiseen ja torjumiseen sekä työntekijöille, väestölle ja ympäristölle aiheutuvat säteilyvaarat ja -riskit. Riskien arviointi on pidettävä ajan tasalla (esimerkiksi toiminnan muuttuessa) ja se olisi hyvä tarkistaa vähintään vuosittain. Riskien arvioinnin tulisi kattaa normaalitoiminnan lisäksi myös mahdolliset poikkeavat tapahtumat. [4]

7.1 Toiminnallinen säteilyturvallisuus

Toiminnallinen säteilyturvallisuus toteuttaa säteilysuojeluohjelmaa käytännössä. Toiminnallisen säteilyturvallisuuden suunnitelmaan sisältyy mm. kohdissa 7.1.1–7.1.9 mainitut asiat. [4]

7.1.1 Alueiden ja työntekijöiden luokittelu sekä kulunhallinta

Laitoksen alueet luokitellaan tarkkailu- ja valvonta-alueisiin alueilla mahdollisesti aiheutuvien säteilyannosten mukaisesti. Työntekijät luokitellaan tarvittaessa säteilytyöntekijöiksi. Luokittelun avulla tiloissa työskentelevät (omat ja ulkopuoliset työntekijät) ja vierailevat henkilöt saavat asianmukaisen koulutuksen ja heille järjestetään tarvittava säteilyannosten seuranta. Valvonta- ja tarkkailualueille pääsyä rajoitetaan kulunvalvonnan keinoin ja alueilla itsenäisesti työskenteleville järjestetään säteilyturvallisuuskoulutusta ja annosvalvonta. [4]

STUKin ohjeessa ST 1.6 "Säteilyturvallisuus työpaikalla" kuvataan tarkemmin Suomen viranomaisvaatimusten mukaisia vaatimuksia alueiden jakamisesta valvonta- ja tarkkailualueisiin. [10]

Työntekijöiden luokittelussa säteilytyöntekijöiksi otetaan huomioon tilat, joissa työskentely tapahtuu. Henkilöt luokitellaan säteilytyöluokkiin potentiaalisen annoksen perusteella. Ainakin operaattorit, säteilyn käytön turvallisuudesta vastaavat johtajat ja henkilöt, jotka työskentelevät jatkuvasti kiihdyttimien ja suihkuputkien (beamline) parissa ylläpitotöissä luokitellaan säteilytyöntekijöiksi. [4]

7.1.2 Henkilökunnan annostarkkailu

Toiminnan harjoittaja järjestää annostarkkailun ulkoisen ja sisäisen säteilyn aiheuttaman annoksen määrittämiseksi. Henkilökohtaisten dosimetrin, tilojen säteilyvalvonnan ja kontaminaatiomittausten tulokset arvioidaan säännöllisesti ja niitä verrataan odotettuihin arvoihin ja asetettuihin selvitysrajoihin. [4]

Henkilökohtainen annosvalvonta järjestetään

kaikille luokan A säteilytyöntekijöille ja se on erittäin suositeltavaa myös luokan B säteilytyöntekijöille. Lisäksi valvonta-alueilla henkilöillä on syytä olla käytössä henkilökohtainen säteilyhälytin, josta kertynyt annos voidaan tarkistaa välittömästi. Käsien, sormien ja silmien annosmittauksen tarve arvioidaan työtehtäväkohtaisesti ja sormi- ja/tai silmädosimetrit otetaan tarvittaessa käyttöön. Joissain työtehtävissä saattaa olla tarpeen ottaa käyttöön useampi kokokehon annosta mittaava dosimetri kehon epätasaisen säteilyaltistuksen vuoksi. Toiminnan harjoittajan on syytä varmistua, että käytettävät dosimetrit soveltuvat altistuksen aiheuttavan säteilyn laadun ja energian mittaamiseen. [4]

Sisäistä säteilyä saattaa olla tarpeen tarkkaila, jos on mahdollista altistua radioaktiivisen aineen ihokontaminaatiolle (esim. tritioitu vesi tai jodin radioaktiiviset isotoopit), hengittää radioaktiivisella aineella kontaminoitunutta ilmaa tai niellä radioaktiivista ainetta. Toiminta on syytä suunnitella siten, että sisäinen kontaminaatio pysytään mahdollisimman tehokkaasti välttämään. Sisäisen säteilyn tarkkailun tehtävänä on varmistaa, että sisäinen kontaminaatio on pystytty välttämään käytössä olevin keinoin. Sisäistä säteilyä on tarkkailtava tarvittaessa sisäisen altistuksen todennäköisyyden ja seurausten perusteella. [4]

STUKin ohjeessa ST 7.1 ”Säteilyaltistuksen seuranta” on kuvattu Suomessa voimassa olevat käytännöt ja vaatimukset säteilyaltistuksen seurannalle. [11]

7.1.3 Säteilymittaukset

Laitoksella tulisi olla käytössä säteilymittausohjelma, jolla säteilytilanne voidaan määrittää reaaliaikaisesti ja/tai takautuvasti. Mittausohjelma voidaan toteuttaa aktiivisilla ja passiivisilla mittareilla. Aktiivisilla säteilymittareilla voidaan seurata esimerkiksi työskentelytilojen annosnopeuksia reaaliaikaisesti. Näihin mittareihin on tarvittaessa kytkettävä hälytysvalo tai -ääni varoittamaan tilassa työskenteleviä. Passiivisia mittareita (esim. dosimetrit) voidaan käyttää tilan pitkäaikaiseen säteilyannoksen mittaamiseen ja niiden tuloksia voidaan hyödyntää esimerkiksi työntekijöiden tai väestön annoksia määritettäessä. [4]

Laitoksella tulisi olla käytössä säteilyvalvontaohjelma, joka on suhteutettu toiminnan vaativuuteen ja siihen liittyviin riskeihin.

Säteilyvalvonnalla voidaan seurata toiminnasta syntyneiden radioaktiivisten aineiden aiheuttamaa säteilyä (ml. aktivoituminen). Mittausmenetelminä voivat olla esimerkiksi kannettavalla annosnopeusmittarilla mitatut annosnopeudet, kontaminaatiomittaukset ja ilman radioaktiivisuuspitoisuuden mittaukset. Mittauksia on syytä tehdä erityisesti laitoksen käyttöönottovaiheessa ja silloin, kun on tehty muutoksia, jotka voivat vaikuttaa säteilytasoon. Kun työskennellään aktivoituneiden osien läheisyydessä (esim. huoltotöissä) ja annosnopeus-/säteilytasoa ei tunneta tai se on riittävän suuri aiheuttaakseen merkittäviä säteilyannoksia, on työskentelyalueen säteilytasot määritettävä ennen töihin ryhtymistä. Säteilyvalvontamittausten tulosten tulee olla niitä tarvitsevien työntekijöiden helposti saatavilla. [4]

7.1.4 Säteilytyön ohjaus ja valvonta

Säteilytyön ohjausta ja valvontaa tarvitaan, kun on tarpeen ohjata lyhytaikaista, korkean säteilyannoksen aiheuttavaa työskentelyä tai kun kyseessä on pintojen tai ilman kontaminaatiosta tms. syystä johtuva työtä rajoittava tekijä. Tällaiset toimet ovat yleensä tarpeen vain suurimmilla kiihdyttimillä ja esimerkiksi pienien kaupallisten kiihdyttimien käytössä ne eivät välttämättä ole tarpeellisia. Nämä toimet koostuvat kolmesta osasta: [4]

1. työn suunnittelu, hyväksyntä ja dokumentointi työlupakäytännön kautta
2. työn harjoittelu ennen työsuoritusta
3. hyvät työtavat sisältäen säteily- ja kontaminaatiomittaukset.

Työluvassa huomioidaan laitoksesta riippuen säteilyturvallisuuteen ja työn suorittamiseen liittyvät oleelliset asiat. [4]

7.1.5 Tuotetun radioaktiivisuuden hallinta

Jos kiihdyttimen energia on riittävän suuri, niin sen käytön seurauksena kiihdytin tai sitä ja kohtiota ympäröivät suojarakenteet saattavat aktivoitua. Laitoksella tulisi olla ohjelma, jolla komponenttien ja rakenteiden aktiivisuustasoa seurataan ja niiden aiheuttamaa säteilyannosta voidaan hallita. Aktivoituneet osat, jotka tuottavat erittäin suuren annosnopeustason, joko suojataan tai niille pääsyä rajoitetaan. Alueilla, joilla aktivoituneet komponentit ja rakenteet voivat aiheuttaa suuren

säteilyannoksen, on syytä olla käytössä kohdan 7.1.4 ”Säteilytyön ohjaus ja valvonta” mukaiset toimenpiteet esimerkiksi huoltotoista aiheutuvan säteilyaltistuksen rajoittamiseksi. Jos työskentelyssä on mahdollisuus sisäiseen kontaminaatioon, on työskentelyä varten oltava erityiset ohjeet, riittävät rakenteelliset suojaukset (esim. alipaineiset tilat ja isolaattori) ja henkilökohtaiset suojavarusteet. Joistakin kiihdyttimen osista on syytä olla varakappaleita, jotta mahdollisesti aktivoitunut osa voidaan jättää suojattuna puoliintumaan. Alueet, joilla on kiihdyttimen käytössä syntynyttä radioaktiivisuutta, on luokiteltava aktiivisuustasojen mukaan ja rajoittaa tai valvoa niille pääsyä. [4]

7.1.6 Mittalaitteistot

Laitoksella on oltava riittävät ja tarkoitukseen soveltuvat säteily- ja aktiivisuusmittalaitteet. Mittalaitteille määritetään hyväksyttävyyssvaatimukset sekä kalibrointi- ja/tai toiminnan tarkastusohjelma. Kalibroinnit ja/tai toiminnan tarkastukset tehdään ohjelman mukaisesti ja lisäksi aina, kun laitteelle on tehty huoltoa, joka voi vaikuttaa mittalaitteen kalibrointiin. [4]

Päästömittauslaitteiston herkkyyteen ja tarkkuuteen on syytä kiinnittää erityistä huomiota. Esimerkiksi standardissa ANSI N13.1 (2011) N13.1-2011 ”Sampling and monitoring releases of airborne radioactive substances from the stacks and ducts of nuclear facilities” on kuvattu laitteistoihin liittyviä vaatimuksia.

7.1.7 Radioaktiivisen materiaalin, lähteiden ja jätteiden hallinta

Laitoksella tulee olla menettelyt radioaktiivisen materiaalin, lähteiden ja jätteiden hallintaan. Menettelyiden on syytä kattaa näiden tuottaminen, hankkiminen, tunnistaminen, merkitseminen, kirjanpito, käyttäminen, kuljettaminen, varastointi, käsittely ja hävittäminen. Menettelyiden laajuuden olisi oltava suhteessa menettelyn kohteena olevan materiaalin vaarallisuuteen. [4]

Kiihdyttimen ja suihkulinjan osat sekä muut laitteet ja suojamateriaalit, joiden aktiivisuus tai pinta-annosnopeus ylittää toiminnan harjoittajan niille asettamat raja-arvot, on pidettävä valvottuina. Osana valvontaan kuuluu mm. tunnistaminen ja merkitseminen, sekä lyhyt- ja pitkäaikaisvarastointitilat. [4]

Radioaktiivisen jätteen käsittelyä ja varastointia varten tulisi olla tila, joka on varattu vain tähän tarkoitukseen. Radioaktiivista jätettä ei saa varastoida tarpeettomasti. Varastointitilan tulee olla sellainen, että siellä voidaan vaarattomasti vanhentaa radioaktiivinen jäte asianmukaista hävittämistä varten. Radioaktiivisten jätteiden sisältämät radionuklidit ja niiden aktiivisuudet tunnistetaan ja kirjataan ennen niiden hävittämistä. [4]

7.1.8 Kiihdyttimen ympäristön radiologinen suojaaminen

Kiihdyttimen käyttö voi synnyttää ympäristöön (ilma, maa, pohja- ja pintavesi) erityyppisiä radioaktiivisia aineita riippuen kiihdyttimen tyypistä, säteilysuojauksista ja geohydrologisista olosuhteista. Laitoksen ilma- ja vesipäästöissä voi olla radioaktiivisia aineita kaasumaisina, aerosoleina tai hiukkasina. Suojauksien läpi tuleva gamma-, neutroni- tai myonisäteily voi aiheuttaa ihmisille säteilyannosta suoraan tai epäsuorasti esimerkiksi taivassirontana. Suuritehoisten kiihdyttimien osalta saattaa olla tarpeellista kartoittaa ympäristön säteilytilanne ennen toiminnan aloittamista ja seurata sitä säännöllisesti toiminnan aikana. Kiihdytinlaitos suunnitellaan ja sitä käytetään siten, että radioaktiivisten päästöjen ja säteilyn määrä ympäristössä pystytään pitämään mahdollisimman pienenä. Esimerkiksi kaasumaisia päästöjä ympäristöön tulee kontrolloida, jos ilmaan pääsee radioaktiivisia aineita. [4]

STUKin ohjeessa ST 6.2 ”Avolahteiden käytöstä syntyvät radioaktiiviset jätteet ja päästöt” sanotaan, että radioaktiivisten jätteiden käsittelystä edustavalle henkilölle aiheutuva efektiivinen annos saa olla enintään 10 µSv vuodessa. Lisäksi ohjeessa on tarkennettu, että kun radioaktiivisia aineita päästetään ulkoilmaan, päästöt on rajoitettava siten, että päästöistä edustavalle henkilölle aiheutuva efektiivinen annos on enintään 10 µSv vuodessa. [12]

Laitoksen tulee huomioida tarvittavien mittausten laadut (mittauskohteet ja mitattava säteily), mittausmenetelmä (jatkuva vai näytteenotto), mittalaite (aktiivinen vai passiivinen), mittausherkkyys, mahdollinen taustasäteily ja mittausjärjestelyn laadunvarmistus. Käytössä tulee olla menettely, jolla varmistetaan, että kaikki tarpeelliset mittaukset on tehty ja kirjattu. [4]

7.1.9 Laitoksen puhdistus- ja käytöstäpoistosuunnitelma

Laitoksen puhdistamiseen ja käytöstäpoistoon liittyvät toiminnot tulisi huomioida jo laitoksen käyttöönotosta asti. Jos ennen käyttöönottoa on tehty ympäristön säteilykartoitus, niin näitä tuloksia käytetään, kun varmistetaan, että laitoksen ympäristö on riittävän puhdas käytöstäpoiston jälkeen. [4]

STUKin ohjeessa ST 1.5 ”Säteilyn käytön vapauttaminen turvallisuusluvasta” on esitetty vapaa- ja vapauttamisrajan soveltamisperiaatteet ja menettelyt radioaktiivisen materiaalin uudelleenkäytölle, kierrätykselle ja hävittämiselle jätteenä. [13] IAEA:n julkaisua (Application of the concept of exclusion, exemption and clearance 2004) voidaan käyttää apuna kun luodaan toimintatapoja radioaktiivisten jätteiden hävitykseen.

Käytöstäpoistosuunnitelma tulisi olla ole-massa jo laitoksen suunnitteluvaiheessa. Käytöstäpoistosuunnitelma ei ole välttämätön, jos laitoksessa ei tuoteta tai siellä ei käsitellä pitkäikäisiä radionuklideita ($T_{1/2} > 120$ d). Käytöstäpoistosuunnitelmassa huomioidaan laitoksessa säilytettävät ja käytettävät radioaktiiviset materiaalit mukaan lukien jätteet sekä kontaminoituneet tai aktivoituneet rakenteet ja tarvikkeet. Käytöstä syntyvien aktiivisuuksien tunteminen etukäteen on tärkeää, jotta voidaan arvioida syntyvien, mahdollisesti radioaktiiviseksi jätteeksi luokiteltavien, materiaalien hävittämisreittejä ja -kustannuksia. Käytöstäpoistosuunnitelman olisi syytä kattaa ainakin seuraavat osa-alueet: [4]

- käytöstä syntyvät radioaktiiviset materiaalit
- mittaussuunnitelma, jolla materiaalien aktiivisuudet ja radionuklidit voidaan todentaa
- hävittämissuunnitelma, jonka mukaan materiaaleja voidaan hävittää tarvittaessa jo laitoksen käytön aikana
- puhdistettujen tilojen toteaminen puhtaaksi.

Joissain tapauksissa voi olla perusteltua vaatia käytöstäpoistoa varten rahoitussuunnitelma. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi pankkitakausta tai rahastoa. [4]

7.2 Organisaatio

Kiihdyttimillä työskentelevän henkilökunnan tulee olla pätevää ja heitä on syytä olla riittävästi. Henkilökunnan pätevyysvaatimukset ja lukumää-

rä riippuvat kiihdytinlaitoksen koosta. Isoissa laitoksissa säteilyturvallisuusorganisaatio on hyvä erottaa muusta organisaatiosta, jotta esimerkiksi tuotannolliset vastuut eivät muodostu turvallisuutta tärkeämmäksi. [2]

Laitoksella tulee olla säteilysuojelukoulutusohjelma, jotta henkilöiden (työntekijät, urakoitsijat, vierailijat) koulutustarpeet voidaan tunnistaa ja he saavat työtehtäviinsä ja vastuisiinsa nähden oikeanlaista koulutusta. Tarvittaessa koulutusohjelmaan sisällytetään pätevyyden varmistava menettely. Saadusta koulutuksesta pidetään kirjaa, jotta koulutuksia voidaan hallinnoida. Säteilysuojelukoulutusohjelmaan on syytä sisällyttää täydennyskoulutusohjelma, joka kattaa mm. laitoksen säteilyturvallisuusjärjestelmät. [4]

Kiihdytinoperaattorien perehdytys työhönsä on syytä kuvata kirjallisesti. Perehdytyksen käytyään ja pätevoidyttyään he operoivat kiihdyttimen toimintaohjeiden mukaisesti. Operaattorit ovat vastuussa laitteen/laitoksen säteilyturvallisesta toiminnasta ja tämän vuoksi heillä on oltava oikeus keskeyttää kiihdyttimen toiminta turvallisuussyistä. [4]

On tärkeää luoda menettelyt raportoinnille turvallisuusasioista, laitehäiriöistä, varoituksista ja toimintaohjeista poikkeamisesta. Kiihdyttimen käytöstä tulee pitää kirjaa, johon sisältyy vähintään säteilytysparametrit ja mahdolliset käytönaikeiset hälytykset. [4]

7.3 Kiihdyttimien huolto

Kiihdyttimille on tärkeää luoda kattava ennakko-huolto-ohjelma. Riittävillä ennakko-huolloilla voidaan ehkäistä odottamattomia vikahuoltoja. Hyvin suunnitellussa ennakko-huollossa säteilyannokset jäävät normaalisti pienemmiksi kuin vikahuolloissa. Huollot on syytä hyväksyttää kiihdyttimen käytöstä ja säteilyturvallisuudesta vastaavalla henkilöllä. Huolloista pidetään kirjaa ja huoltotöiden jälkeen saattaa olla tarpeen pitää loppukatselmus ennen laitteen käyttöönottoa. [4]

7.4 Varautuminen poikkeaviin tapahtumiin

Kiihdytinlaitoksella tulee olla suunnitelmat ja ohjeet mahdollisten poikkeavien tapahtumien varalle. Tällaisia poikkeavia tapahtumia ovat esimerkiksi tulipalot, myrskyt, sähkökatkot, lainvastainen toiminta (murrot), vakavat loukkaan-

tumiset, merkittävät radiologiset onnettomuudet ja kontaminaatiotapaukset sekä muut yllättävät tapahtumat, jotka aiheuttavat vaaraa laitoksen henkilökunnalle, sen ympäristölle tai itse laitokselle. Suunnitelmissa määritellään henkilökunnan vastuut ja tehtävät poikkeavissa tapahtumissa sekä mahdollisesti toimiin osallistuvat ulkopuoliset toimijat. Lisäksi niissä kuvataan tilanteissa tarvittavat varusteet ja materiaalit, toimintaohjeet tilanteiden hoitamiseksi ja ilmoitusmenettelyt tapahtumien aikana. Varautumissuunnitelman ajantasaisuus on hyvä tarkastaa säännöllisesti. [4]

7.5 Laitoksen rakenteet

Kiihdyttimen aiheuttamaa säteilyä vastaan rakennetut suojat ovat tilasuunnittelussa tärkeä tekijä. Näiden passiivisten suojusten lisäksi on kiinnitettävä huomiota mm. säteilymittauksiin, sisäänpääsyvaatimuksiin ja turvakytkimiin. Alla on kuvattu tarkemmin laitoksen rakenteisiin liittyviä asioita, joihin on syytä kiinnittää huomiota. [2]

Sisään- ja ulospääsy. Ulospääsyn osalta on syytä huolehtia, että hätäpoistumistiet ovat käytettävissä. Isojen oviaukkojen rakentaminen esimerkiksi laitteiden haalauksen vuoksi saattaa olla tarpeellista, mutta niiden osalta tulee löytää säteilyturvalliset ratkaisut. [2]

Aktivaatio. Kiihdyttimet voivat tuottaa aktiivisuuden kautta radioaktiivisia materiaaleja, jotka on otettava huomioon erityisesti huoltotöiden aikana ja siinä, kuinka laitokselta poistetaan mahdollisesti aktivoitunutta materiaalia. Kiihdyttimellä aktiivisuuden kautta syntyvät radionuklidit hajoavat usein positroniemission tai elektronisieppauksen kautta. Näitä radionuklideita voi olla joissain tapauksissa hankala havaita tavallisilla säteilymittareilla. Materiaalien aktivoitumista voidaan välttää oikeanlaisilla materiaalivalinnoilla. Vaikka tällaiset materiaalit voivat olla hankintavaiheessa kalliimpia, niin aktivoituneiden materiaalien huoltotöille aiheuttama haitta ja lopullinen käytöstäpoisto voivat lisätä kuluja huomattavasti. Ohuiden aktivoituneiden kappaleiden, kuten kohtiokalvojen, käsittelyssä on syytä huomioida näiden mahdollinen mureneminen ja kontaminaatiovaara. Kaikki mahdollisesti radioaktiivinen kiihdytintiloista poistettava tavara on pystyttävä mittaamaan. Jo suunnitteluvaiheessa on syytä huomioida mahdollisesti aktivoituvat osat ja tarvittaessa suojata ne säteilyannoksen pienentä-

miseksi. Säteilymittaustieto tulisi olla saatavilla aina kiihdytintilaan mentäessä kaikilla oviaukoilla. Tärkeimpien aktivoituneiden komponenttien annosnopeuksia on hyvä seurata säteilytysten jälkeen ja niiden annosnopeuksille määrittää puoliintumisaikat, jotta huoltotyöt voidaan tehdä etukäteissuunnitelman mukaisesti välttämällä liian suuria annosnopeuskenttiä. Kiihdyttimen huoltotöissä on käytettävä säteilyhälyttimiä, joista pystytään lukemaan kertynyt annos. Joitakin kiihdyttimen osia on hyvä olla useampi kappale kierrossa, jotta huoltotyö voidaan tehdä jo jonkin aikaa puoliintuneelle osalle. Tällaisia ovat esimerkiksi kohtiot. [2]

Ilmanvaihto. Kiihdyttimet voivat synnyttää radioaktiivisia ja toksisia kaasuja, kuten otsonia, suoraan tai sekundääriseen säteilyn kautta. Joissain tilanteissa ilmanvaihto voi olla syytä pitää minimissä, jotta radioaktiiviset kaasut ehtivät puoliintua ennen päästöä ulkoilmaan. Useimmiten kuitenkin ilmanvaihdon tulee olla tehokas, jotta tilasta saadaan poistettua ylimääräinen lämpö, jota laitteistot kehittävät. Lisäksi radioaktiiviset ja toksiset kaasut on saatava pois tilasta, ennen kuin henkilökunta voi mennä tilaan. [2]

Muiden laitteiden turvallisuus. Kiihdytinalteistoihin liittyy osia tai laitteita, jotka muodostavat riskin työturvallisuudelle. Näitä ovat mm. korkeajännitteet, RF ja suuret magneettikentät. [2]

7.6 Turvalaitteet

Suurilla kiihdyttimillä tarvitaan hyvin suunniteltua tekniikkaa, jolla voidaan taata esimerkiksi turvallinen työskentely kohtioasemalla samalla, kun kiihdytintä ajetaan toiselle kohtioasemalle, jonne kulku on estetty. Nämä turvasysteemit on syytä integroida kiihdyttimen käyttöjärjestelmään. Kulunvalvontalaitteiden ja turvakytkimien tulee olla turvallisesti vikaantuvia (fail safe). Turvalaitteiden ja -järjestelmien toiminta on tarkistettava riittävän usein. [2]

Turvakytkinten toiminta saattaa olla tarkoituksenmukaista suunnitella ja järjestää muulla tavoin kuin tässä selvityksessä on esitetty. Tällöin tulee kuitenkin saavuttaa vähintään sama turvallisuustaso. Apuna voidaan käyttää standardissa IEC 61508 "Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems" esitettyä SIL-konseptia (safety integrity level, suom. turvallisuuden eheystaso). [5]

Jos turvalaitteita on joissain olosuhteissa tar-
koituksenmukaista ohittaa tai kytkeä pois käytös-
tä, näiden toimien oikeutus arvioidaan etukäteen
ja niiden on oltava säteilyn käytön turvallisuudes-
ta vastaavan johtajan hyväksymiä. Turvalaitteita
ei saa kytkeä pois käytöstä, jos tämä voi vaarantaa
henkilöiden turvallisuuden. Turvalaitteiden ohi-
tukset ja pois kytkemiset tulee dokumentoida tar-
kasti ja tiedottaa niistä asianmukaisille tahoille.
Pois päältä kytketty turvalaite korvataan jollain
vaihtoehtoisella ratkaisulla, jos työntekijöiden sä-
teilyturvallisuuden taso laskee. Tämä korvausme-
nettely tulee dokumentoida. [4]

7.7 Radioaktiivisten jätteiden käsittely

Kiihdyttimien käytössä syntyneet radioaktii-
viset jätteet merkitään ja niistä pidetään kir-
jaa. Jätteiden sisältämät radionuklidit tulee
tunnistaa ja niiden aktiivisuustasot määrittää.
Kiihdytintilojen käytöstäpoiston yhteydessä, kun
puretaan esimerkiksi betonirakenteita, kiinnite-
tään erityistä huomiota töihin osallistuvien hen-
kilöiden neuvontaan ja kontaminoitumisen välttä-
miseen. [2]

8 Johtopäätökset

Suomessa hiukkaskiihdyttimien käytössä säteilylainsäädännöllä ja säteilysuojelun perusperiaatteilla, joita ovat oikeutus-, optimointi- ja yksilönsojaperiaate, on suuri rooli riittävän turvallisuustason saavuttamisessa. Nämä periaatteet ovat tällä hetkellä väestön, työntekijöiden ja ympäristön suojelun perusta hiukkaskiihdyttimien käytössä. Koska toimintakohtaiset ohjeet puuttuvat, nykyisistä ohjeista ST-ohjeiden 1-sarjan yleiset ohjeet ovat hyödyllisimpiä toiminnan harjoittajille, jotka käyttävät hiukkaskiihdyttimiä. Lisäksi esimerkiksi matalaenergisten elektronikiihdyttimien osalta on voitu soveltaa ohjeessa ST 5.2 ”Tarkastus- ja analyysiröntgenlaitteiden käyttö” röntgenlaitteiden käytölle asetettuja vaatimuksia. Ohjeista ST 6.1 ”Säteilyturvallisuus avolähteiden käytössä” ja ST 6.2 ”Avolähteiden käytöstä syntyvät radioaktiiviset jätteet ja päästöt” on lisäksi voitu soveltaa käytäntöön mm. tilojen paine-eroihin ja päästöjen määrään liittyviä vaatimuksia.

Muiden maiden kansallisten vaatimusten ja kansainvälisten suositusten tutkiminen osoittaa, että useissa maissa on käytössä hyvin yksityiskohtaisia ohjeita hiukkaskiihdyttimien käytön säteilyturvallisuuden varmistamiseen. Vaikka Suomessa ei ole käytössä yksityiskohtaisia ohjeita hiukkaskiihdyttimien käyttöön, niiden käytön säteilyturvallisuus voidaan katsoa riittäväksi, kun tarkastellaan voimassa olevia säädöksiä ja ST-ohjeita ja otetaan lisäksi huomioon, että Suomessa ei viime vuosien aikana ole hiukkaskiihdyttimien käytössä ilmennyt annosrajoja ylittäviä altistumistapauksia

teollisuuden tai tutkimuksen toimialoilla. Voidaan kuitenkin todeta, että yksityiskohtaisemman ohjeistuksen antaminen hiukkaskiihdyttimien käytölle voisi parantaa säteilyturvallisuutta ja kehittää turvallisuuskulttuuria käyttöorganisaatioissa. Lisäksi yksityiskohtaisempien ohjeiden antaminen yhdenmukaistaisi toiminnan harjoittajien säteilyturvallisuustoimia ja loisi selkeämmän vaatimus pohjan, jonka mukaan uusien kiihdytintilojen ja kiihdyttimien säteilyturvallisuusjärjestelmät suunniteltaisiin.

Jos ratkaisua haetaan kansainvälisistä maleista, on otettava huomioon Suomen kansallinen näkökulma säteilysuojeluun ja mietittävä STUKin tämänhetkisiä vaatimuksia hiukkaskiihdyttimille ja niiden käytölle.

Kokemuksen perusteella voidaan todeta, että nykyisin suoritettavalla valvonnalla kyetään varmentamaan hiukkaskiihdyttimien käytön säteilyturvallisuus. Myös nykyiset säteilylaki ja -asetus sekä hiukkaskiihdyttimien käyttöön sovellettavat ST-ohjeet kattavat hiukkaskiihdyttimien käytön kannalta välttämättömät vaatimukset. Toiminnan harjoittajat ovat kuitenkin ilmaisseet, että toimintakohtaiset ST-ohjeet hiukkaskiihdyttimien käytölle selkeyttäisivät käyttöön liittyviä vaatimuksia. Selvityksen aikana todettiin, että toimintakohtaisen ohjeistuksen puute ei ole varsinaisesti heikentänyt säteilyturvallisuutta, mutta ohjeistuksella voitaisiin helpottaa säteilyturvallisuuden varmistamista sekä toiminnan harjoittajan että valvovan viranomaisen näkökulmasta.

9 Ehdotuksia viranomaisvaatimuksiksi Suomeen

Seuraavassa on esitetty selvitysyön aikana esiin nousseet ehdotukset hiukkaskiihdyttimien käytön viranomaisvaatimuksiksi, jotka selvityksen tekijä ehdottaa kirjattavan esimerkiksi hiukkaskiihdyttimien käyttöä koskeviin STUKin vaatimuksiin tai ohjeisiin sekä tarvittaessa säteilylakiin ja -asetukseen. Esitetyt ehdotukset viranomaisvaatimuksiksi soveltuvat erityisesti syklotronien käytön ja syklotronilaitosten valvontaan sovellettavaksi.

9.1 Henkilöstön pätevyys

Oleellisiin tehtäviin säteilyturvallisuuden kannalta on nimettävä henkilöt ja heillä tulee olla riittävä pätevyys näihin tehtäviin. Lisäksi on suositeltavaa (vaativimpien kiihdytintoimintojen osalta pakollista), että laaditaan tehtäväkohtaiset perehdytysuunnitelmat, jotka sisältävät ainakin toimeen liittyvät tehtävät, laitoksen teknisen toiminnan, soveltuvat viranomaisvaatimukset ja laitoksen operointiolosuhteet. Henkilökunta voidaan kouluttaa myös suorittamaan useampia tehtäviä, mutta niiden samanaikainen suorittaminen ei ole suositeltavaa. Viranomainen määrittelee täydennyskoulutuksen määrän ja sen, miten usein täydennyskoulutusta tulee henkilöstölle järjestää.

9.2 Riskien arviointi

Säteilyturvallisuusjärjestelmiä suunniteltaessa on otettava huomioon tehty riskien arviointi. Riskien arviointiin voidaan käyttää esimerkiksi FMEA-(failure modes and effects analysis) tai HAZOP-menetelmiä (hazard and operability analysis). Arvioitaessa onnettomuuden seuraamuksia työntekijöille ja väestölle, on arviot tehtävä siten, että valitut säteilyturvallisuusjärjestelmät eivät ole käytössä. Riskien arvioinnin jälkeen harkitaan keinot, joilla työntekijöitä ja väestöä voidaan suojella. Tehokas säteilyturvallisuusjärjestelmä koostuu erilaisista keinoista:

1. rakenteelliset suojaukset
2. hallinnolliset keinot

3. henkilökohtaiset suojavälineet.

9.3 Säteilyturvallisuusjärjestelmät

Tässä kappaleessa kuvatut säteilyturvallisuusjärjestelmät on vähintään kuvattava säteilyturvallisuuksellisuusselvityksessä, mutta niiden asentaminen käyttöön saattaa riippua kiihdytinlaitoksen tyyppistä. Säteilyturvallisuusjärjestelmävaatimuksia voi esimerkiksi soveltaa siten, että pienimmillä kiihdyttimillä on syytä noudattaa tapauskohtaista harkintaa joidenkin yksittäisten vaatimusten osalta. Osa esitetyistä vaatimuksista säteilyturvallisuusjärjestelmille koskee myös kiihdytinlaitoksen muita osia kuin suoraan itse kiihdytintoimintaa, kuten lyijykaappeja (hot cell), mutta näiden vaatimusten esittäminen samalla on kokonaisuuden kannalta luontevin ratkaisu. Myös muunlaiset säteilyturvallisuusjärjestelyt ovat mahdollisia, jos niillä saavutetaan vähintään sama turvallisuustaso.

9.3.1 Turvakytkimet (Interlock)

1. Kiihdytinhallin oven turvakytkin (ovikytkin)
 - Kiihdytin ei käynnisty, jos kiihdytinhallin ovi on auki.
 - Kiihdyttimen säteilysuihku keskeytyy, jos kiihdytinhallin ovi avataan kesken säteilytyksen.
 - Kiihdytinhallin oven avaaminen ei ole sallittua kesken säteilytyksen.
2. Avain tai koodi, jolla estetään kiihdyttimen luovaton käyttö, on säilytettävä turvallisesti.
3. ”Last person out” -kytkimet
 - Kytkimet on sijoitettava siten, että voidaan varmistua siitä, ettei kukaan jää kiihdytinhalliin, kun laite käynnistetään.
 - Jos ovi avataan, täytyy koko varmistusprosessi aloittaa alusta.
 - ”Last person out” -kytkimet tulisi kytkeä saraan ovikytkimen kanssa.
4. Annosnopeuteen perustuva turvakytkin kiihdytinhallin (ja lyijykaappien (hot cell)) ovelta

5. Itsesuojatuissa kiihdyttimissä ja kiihdyttimillä, joissa on käytössä paikallissuojaus, käytön estävä turvakytin, jos laite ei ole turvallisessa tilassa (suojaukset suljettu) tai jos suojauksen kapasiteetti on heikentynyt (esim. nestepinnan laskenut taso)
6. Korkean annosnopeuden turvakytin
 - Säteililyksen katkaisu, jos annosnopeus nousee liian suureksi valvomattomilla alueilla
7. Turvakytin ilmapäästöille
 - Jos asetettu päästöarvo ylittyy, ohjataan päästöt automaattisesti niiden viivytyksen-/keräysjärjestelmään.
8. Manuaaliset turvajärjestelmät
 - Hätätyskytkimet
 - Kiihdytin- ja kohtiohallien ovien avaaminen sisäpuolelta.

9.3.2 Suojaukset

1. Suojauslaskelmat on esitettävä yksityiskohtaisesti (kaavat, mallit, mallinnuskoodit ja vuosittaiset työtunnit/altistuminen) ottaen huomioon tuotannot, huollot ja käyttöönottoon liittyvät testit. Laitoksen kaikissa tiloissa on arvioitava väestön ja työntekijöiden vuosittaiset säteilyannokset.
2. Itsesuojatun kiihdyttimen tai kiihdyttimen paikallissuojauksien käyttö ei vapauta suojauslaskelmista.
3. Kiihdytinhallin suojauslaskelmien lisäksi hot cellit, siirtolinjat, ilmapäästöjärjestelmä ja läpiviennit tulee huomioida suojauslaskelmissa. Laskelmat on tehtävä worst case -asetelman mukaisesti:
 - Kiihdytin toimii suurimmalla mahdollisella virralla ja energialla.
 - On huomioitu mahdollinen kahden kohtion yhtäaikainen säteilytys siten, että valittuna on kaksi eniten säteilyä tuottavaa kohtiota.
 - Laskelmissa käytetään suurinta mahdollista aktiivisuutta (myös siirtolinjojen ja hot cellien osalta).
4. Suojauslaskelmien tulisi vähintään sisältää:
 - Lähdetermi (source term): neutroni- ja gamma-säteily 1 m:n etäisyydellä kiihdyttimestä (ottaen huomioon käyttömäärän) ja suurin mahdollinen kiihdyttimellä tuotettava aktiivisuus
 - Säteilylähteiden ja laskentapisteen välimatkat
 - Suojausmateriaalien tyypit ja tiheydet (HVL/

TVL)

- Oleskelutekijät
 - Alueiden kuvaus (valvomattomat alueet, tarkkailualueet, valvonta-alueet, yleiset alueet)
 - Annosnopeus laskentapisteissä yksityiskohtaisine laskuineen
 - Viitteet.
5. Annosrajoituksia ja mahdollisia vertailutasoja on käytettävä turvallisuuden ja säteilysuojelun optimoinnissa.
 6. Optimoidut säteilyturvallisuus- ja säteilysuojelutoimenpiteet vallitsevissa olosuhteissa on määritettävä ottaen huomioon altistumisten luonne, mahdollisuus ja suuruus.
 7. Optimoinnin tulosten perusteella tulisi asettaa kriteerit, joilla vähennetään altistumisen todennäköisyyttä ja suuruutta sekä keinot, joilla ehkäistään poikkeavia tapahtumia ja pienennetään niistä mahdollisesti aiheutuvia seurauksia.

9.3.3 Varoitusvalot ja -äänimerkit

1. Kiihdytinhallin oven avaaminen ja sulkeminen
2. Hot cellien avaaminen
3. Kiihdyttimen tila (RF, magneetti, ionilähde)
4. Säteililyksen aloittamisen merkkiäni (ennen säteililyksen alkamista)
5. Päästöt ympäristöön
6. Kohtioiden säteililyksen aikaiset olosuhteet (mm. lämpötila ja paine)
7. Kiihdyttimen omasuojaus (self-shield), paikallissuoja (local shield) tai kiihdytinhallin ovi auki
8. Ennalta asetetut annosnopeusrajat ylittyvät.
9. Tuotteen siirto kiihdyttimeltä hot celliin.

9.3.4 Muita turvallisuusvaatimuksia

1. Kannettavia kontaminaatiomittareita on oltava saatavilla tiloissa, joissa käsitellään avo-lähteitä.
2. Jos käytössä on itsesuojattu kiihdytin, on sen suojauksen tarkistukset tehtävä säännöllisesti (koostumus, eheys, pH, määrä).
3. Tuotteiden siirto kohtiolta hot celleihin:
 - Radioaktiivista materiaalia ei voi siirtää kohtiolta, jos hot cellin ovi on auki.
 - Radioaktiivista materiaalia ei voi siirtää kohtiolta, jos hot cell ei ole riittävässä alipaineessa.
 - Hot cellin ovea ei voi avata, kun radioaktiivista materiaalia siirretään hot celliin.

4. Itsesuojatussa kiihdyttimessä on oltava järjestelmä, joka estää suojan avaamisen, kunnes siirto hot celliin on suoritettu loppuun asti.
5. Jos kiihdyttimen käyttöä varten on erillinen avain, on se hyvä yhdistää säteilymittariin ja pitää ainoastaan kiihdyttimen käyttöön oikeutetun henkilöstön saatavilla.

9.3.5 Ilmanvaihtojärjestelmä

Kiihdytinlaitoksen ilmanvaihtojärjestelmän tulee täyttää avolähteiden käsittelytilojen perusvaatimukset työntekijöiden ja väestön suojelemiseksi. On kuitenkin huomioitava, että osa lääkkeiden valmistukseen käytettävistä tiloissa tulee olla ylipaineisia tuotteiden suojelemiseksi. Ilma, joka liikkuu kohti vähemmän kontaminoitumiselle alttiita tiloja ylipaineen seurauksena (ja kuljettaa mukanaan mahdollisesti radioaktiivisia aineita), tulee johtaa poistoilmastoinnin suodattimelle. Lisäksi suositellaan, että synteeseistä peräisin olevat radioaktiiviset kaasut, joiden tilaisuus on pieni ja joiden aktiivisuus puoliintuu nopeasti, johdetaan kaasujen säilytys- (traps) tai viivytysjärjestelmiin (delay), joista ne voidaan päästää suodattimien kautta ulkoilmaan, kun ne ovat puoliintuneet.

Yleiset säteilyturvallisuuteen liittyvät suunnitteluperiaatteet ilmanvaihtojärjestelmälle:

1. Niiden tilojen, joissa radioaktiivinen kontaminaatio on mahdollinen, ilmanvaihtojärjestelmä tulisi olla erillinen rakennuksen muusta ilmanvaihdosta tai erotettu siitä sopivilla suodattimilla. (Ilmanvaihtojärjestelmä tulisi olla merkitty varoitusmerkein.)
2. Ilman tulisi liikkua niiden alueiden/tilojen suuntaan, joissa on suurempi potentiaalinen kontaminaatio.
3. Alueet, joiden potentiaalinen kontaminaatio on erisuuruinen, tulisi erotella toisistaan sopivilla suodattimilla.
4. Hot cellien ilman tulisi vaihtua vähintään 20 kertaa tunnissa (yli 40-kertainen ilmanvaihto on suositeltavaa), huoneiden ilman vähintään 5 kertaa tunnissa ja kiihdytinhallin ilman vähintään 3 kertaa tunnissa.
5. Hot cellien tulisi läpäistä alipaineen pysyvästi siten, että ne menettävät tunnissa vähemmän kuin 0,1 % alipaineisuudestaan (suositus < 0,01 %).
6. Avolähteiden käsittelyssä ilman virtausnopeuden käsittelykaappien työskentelyaukossa on yleisesti oltava vähintään 0,5 m/s.
7. Poistoilman suodatuksessa tulisi ottaa huomioon sekä kaasut/höyryt että aerosolit.
8. Ilmanvirtausmäärien ja -nopeuksien automaattinen säätö
9. Henkilöiden ja tavaroiden sisäänmeno ja ulostulo tulisi tapahtua sulkujen kautta.
10. Lisäksi ilmanvaihtojärjestelmään tulisi kuulua seuraavat varusteet:
 - Paine-eromittarit hot celleissä ja huoneissa
 - Sisään tulevan ilman virtausmäärien ja -nopeuksien mittarit hot celleissä
 - Hot cellien painemittareiden tulisi olla neulatai putkipainemittareita.
 - Erityistä huomiota tulee kiinnittää tiivistesten ja ilmatiiviiden järjestelmien laatuun, asentamiseen ja tarkistuksiin.
 - Suodattimet tulisi asentaa niin, että ne edistävät radioaktiivisten aineiden kiinnittymistä menettämättä tehokkuuttaan.
 - Hot cellien ilman sisäänmeno- ja ulostuloventtiilien tulisi olla asennettu siten, että niihin pääsee käsiksi.
 - Helppo pääsy suodattimille on syytä huomioida jo tilojen suunnittelussa.
11. Yleiset suositukset minimivarusteiksi, joilla voidaan tarkistaa ilmanvaihtojärjestelmän toiminta:
 - Virtausmittari
 - Lämpömittari
 - Neula- tai putkipainemittari, jolla hot cellien toiminta voidaan tarkistaa riittävällä tasolla ja tarkkuudella
 - Paine-eromittari
12. Yleiset suositukset liittyen ilmanvaihtojärjestelmän säteilyturvallisuusasioihin:
 - Suodattimien vaihtoperusteet on määritetty.
 - Suodattimien vaihto on ohjeistettu ottaen huomioon suodattimiin mahdollisesti kiinnittyneiden radioaktiivisten aineiden puoliintumisen.
 - Hot cellien testausmenetelmät on ohjeistettu.

10 Viitteet

1. Persico E, Ferrari E, Segre SE. Principles of particle accelerators. New York: W.A. Benjamin; 1968.
2. National Council on Radiation Protection and Measurements. Radiation protection for particle accelerator facilities. NCRP Report No. 144. Bethesda MD: NCRP; 2013.
3. Swanson WP. Improved calculation of photoneutron yields released by incident electron. Health Physics 1979; 37: 347-367.
4. ANSI/HPS N43.1:2011. Radiation safety for the design and operation of particle accelerators. Washington D.C.: American National Standards Institute.
5. IEC 61508-1-7:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Geneva: International Electrotechnical Commission.
6. International Atomic Energy Agency. Authorization and inspection of cyclotron facilities. Draft of IAEA-TECDOC 1525-1526. Vielä julkaisematon.
7. International Atomic Energy Agency. Cyclotron produced radionuclides: Guidelines for setting up a facility. Technical Report Series No. 471. Vienna: IAEA; 2009.
8. Neuvoston direktiivi 2013/59/Euratom, annettu 5 päivänä joulukuuta 2013, turvallisuutta koskevien perusnormien vahvistamisesta ionisoivasta säteilystä aiheutuvilta vaaroilta suojelemiseksi ja direktiivien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom ja 2003/122/Euratom kumoamisesta. EUVL nro L 13, 17.1.2014.
9. Säteilylähteiden käyttötilojen suunnittelu. Ohje ST 1.10. Säteilyturvakeskus (14.7.2011).
10. Säteilyturvallisuus työpaikalla. Ohje ST 1.6. Säteilyturvakeskus (10.12.2009).
11. Säteilyaltistuksen seuranta. Ohje ST 7.1. Säteilyturvakeskus (14.8.2014).
12. Avolähteiden käytöstä syntyvät radioaktiiviset jätteet ja päästöt. Ohje ST 6.2. Säteilyturvakeskus (3.10.2014).
13. Säteilyn käytön vapauttaminen turvallisuusluvasta. Ohje ST 1.5. Säteilyturvakeskus (12.9.2013).

11 Kirjallisuutta

International Atomic Energy Agency. Radiological safety aspects of the operation of electron linear accelerators. Technical Reports Series No. 188. Vienna: IAEA; 1979.

International Atomic Energy Agency. Cyclotron produced radionuclides: Guidance on facility design and production of [¹⁸F]Fluorodeoxyglucose (FDG). Radioisotopes and Radiopharmaceuticals Series No. 3. Vienna: IAEA; 2012.

International Atomic Energy Agency. Cyclotron produced radionuclides: Operation and maintenance of gas and liquid targets. Radioisotopes and Radiopharmaceuticals Series No. 4. Vienna: IAEA; 2012.

International Atomic Energy Agency. Cyclotron produced radionuclides: Principles and practice. Technical Report Series No. 465. Vienna: IAEA; 2008.

International Atomic Energy Agency. Cyclotron produced radionuclides: Physical characteristics and production methods. Technical Report Series No. 468. Vienna: IAEA; 2009.

International Atomic Energy Agency. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety Reports Series No. 19. Vienna: IAEA; 2001.

National Council on Radiation Protection and Measurements. Screening models for releases of radionuclides to atmosphere, surface water, and ground. NCRP Report No. 123 I. Bethesda MD: NCRP; 1996.

National Council on Radiation Protection and Measurements. Screening models for releases of radionuclides to atmosphere, surface water, and ground – work sheets. NCRP Report No. 123 II. Bethesda MD: NCRP; 1996.

U.S. Department of Energy. Accelerator facility safety implementation. Guide for DOE O 420.2B. Safety of Accelerator Facilities. Washington: U.S. DOE; 2005.

Liu JC, Vashek V, Walker LS. Engineered and administrative safety systems for the control of prompt radiation hazards at accelerator facilities. SLAC-PUB-13048. Menlo Park: SLAC National Accelerator Laboratory; 2007.

Stålsäkerhetsmyndigheten. Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om verksamhet med accelerators och slutna strålkällor. SSMFS 2008:27. Stockholm: SSM; 2008.

STUK-B sarjan julkaisuja

STUK-B 208 Lehto J. Säteilyturvallisuus hiukkaskiihdyttimien käytössä.

STUK-B 207 Suutari J (toim.). Radiologisten tutkimusten ja toimenpiteiden määrät vuonna 2015.

STUK-B 206 Pastila R (ed.). Radiation practices. Annual report 2015.

STUK-B 205 Finnish report on nuclear safety. Finnish 7th national report as referred to in Article 5 of the Convention on Nuclear Safety.

STUK-B 204 Vesterbacka P (toim.). Ympäristön säteilyvalvonta Suomessa. Vuosiraportti 2015. – Strålningsövervakning av miljön i Finland. Årsrapport 2015. – Surveillance of Environmental Radiation in Finland. Annual Report 2015.

STUK-B 203 Kainulainen E (ed.). Regulatory oversight of nuclear safety in Finland. Annual report 2015.

STUK-B 202 Pastila R (toim.). Säteilyn käyttö ja muu säteilylle altistava toiminta. Vuosiraportti 2015.

STUK-B 201 Kainulainen E (toim.). Ydinenergian käytön turvallisuusvalvonta. Vuosiraportti 2015.

STUK-B 200 Okko O (ed.). Implementing nuclear non-proliferation in Finland. Regulatory control, international cooperation and the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty. Annual report 2015.

STUK-B 199 Julin S (toim.). Varautuminen säteilytilanteisiin ja poikkeavat tapahtumat. Kolmannesvuosiraportti 3/2015.

STUK-B 198 Julin S (toim.). Varautuminen säteilytilanteisiin ja poikkeavat tapahtumat. Kolmannesvuosiraportti 2/2015.

STUK-B 197 STUK's review on the construction license stage post closure safety case of the spent nuclear fuel disposal in Olkiluoto.

STUK-B 196 STUK's statement and safety assessment on the construction of the Olkiluoto encapsulation plant and disposal facility for spent nuclear fuel.

STUK-B 195 Säteilyturvakeskuksen lausunto ja turvallisuusarvio Olkiluodon käytetyn ydinpolttoaineen kapselointi- ja loppusijoituslaitoksen rakentamisesta.

STUK-B 194 Pastila R (ed.). Radiation practices. Annual report 2014.

STUK-B 193 Järvinen V, Kaivola M, Ojanperä A, Tala M, Tarkkonen T. Kyselytutkimus toiminnanharjoittajille säteilylainsäädännön uudistustarpeista.

STUK-B 192 Julin S (toim.). Varautuminen säteilytilanteisiin ja poikkeavat tapahtumat. Kolmannesvuosiraportti 1/2015

STUK-B 191 Kainulainen E (ed.). Regulatory oversight of nuclear safety in Finland. Annual report 2014.

STUK-B 190 Vesterbacka P (toim.). Ympäristön säteilyvalvonta Suomessa. Vuosiraportti 2014. – Strålningsövervakning av miljön i Finland. Årsrapport 2014. – Surveillance of Environmental Radiation in Finland. Annual Report 2014.

STUK-B 189 Pastila R (toim.). Säteilyn käyttö ja muu säteilylle altistava toiminta. Vuosiraportti 2014.

STUK-B 188 Julin S (toim.). Varautuminen säteilytilanteisiin ja poikkeavat tapahtumat. Kolmannesvuosiraportti 3/2014.

STUK-B 187 Kainulainen E (toim.). Ydinenergian käytön turvallisuusvalvonta. Vuosiraportti 2014.

STUK-B-raportit STUKin verkkosivuilla:
www.stuk.fi/julkaisut/valvontaraportit



Laippatie 4, 00880 Helsinki
Puh. (09) 759 881, fax (09) 759 88 500
www.stuk.fi

ISBN 978-952-309-348-5 (pdf)
ISSN 2243-1896
Helsinki 2017